第 38 卷第 9 期 生 态 学 报 Vol.38,No.9
2018 年 5 月 ACTA ECOLOGICA SINICA May,2018

DOI: 10.5846/stxb201704050578
罗盛锋,闫文德.广西北部湾沿岸地区生态系统服务价值变化及其驱动力.生态学报,2018,38(9):3248-3259.
Luo S F,Yan W D.Evolution and driving force analysis of ecosystem service values in Guangxi Beibu Gulf coastal areas, China.Acta Ecologica Sinica,2018,38(9):3248-3259.

# 广西北部湾沿岸地区生态系统服务价值变化及其驱动力

罗盛锋[1,2],闫文德[1,3,*]
1 中南林业科技大学,长沙 410004
2 桂林理工大学旅游学院,桂林 541004
3 南方林业生态应用技术国家工程实验室,长沙 410004

**摘要**:掌握生态系统结构及其功能的时空变化规律是开展科学生态系统管理的重要前提,如何衡量人类在满足自我需求的同时对自然资源和生态系统的改变程度是当前研究值得关注的一个问题。伴随北部湾经济区的崛起,区域经济发展与生态保护的矛盾日益凸显,海水倒灌、植被退化和土地沙化等现象加剧,生态系统服务可持续供给受到严重威胁。以时序遥感数据为基础,分析北部湾沿岸地区生态系统时空演变,评估生态系统服务价值时空变化规律及其驱动因素,为区域生态系统管理提供科学基础。研究显示:1999—2014 年,城市点状、离散扩张使城市生态系统面积显著增加,破碎化程度加剧;环境恶化给湿地生态系统带来毁灭性的破坏,红树林不断消失,破碎度增加;林地和果园构成的森林生态系统面积有所增加,而耕地面积急剧缩减。生态系统构成中,森林生态系统服务价值最高,约占研究区总价值的 50%,且呈增长趋势;生态系统服务构成中,除食物生产、气体调节和维持养分循环价值有所减少外,其他类型生态系统服务价值均呈增长趋势。驱动力分析表明,综合城镇化率是影响北部湾沿岸地区生态系统服务价值变化的重要驱动因素,说明区域生态系统服务与社会经济发展极为相关,合理调控经济结构可有效提升区域生态系统服务价值。

**关键词**:生态系统服务价值;价值当量因子;景观格局;驱动机制;北部湾

## Evolution and driving force analysis of ecosystem service values in Guangxi Beibu Gulf coastal areas, China

LUO Shengfeng[1,2], YAN Wende[1,3,*]
1 *Central South University of Forestry and Technology*, *Changsha* 410004, *China*
2 *School of Tourism*, *Guilin University of Technology*, *Guilin* 541004, *China*
3 *National Engineering Laboratory for Applid Technology of Forestry & Ecology in South China*, *Changsha* 410004, *China*

**Abstract**: With the economic development of the Beibu Gulf economic zone, environmental problems, such as seawater intrusion, vegetation degradation, and desertification in the coastal areas have become more important and pose a serious threat to regional ecological security. The low ecosystem services value has become one of the key factors restricting the rapid economic development of the Beibu Gulf area. Evaluating the ecosystem service value of the Beibu Gulf coastal areas, demonstrating its evolution characteristics, and analyzing the main driving factors are of great significance when attempting to promote the ecological construction and sustainable development of this area. Landsat remote sensing images in 1999, 2006, and 2014 of the study area were the main data source. First, we used the supervised classification and thematic

**基金项目**:国家林业公益性行业科研专项(201404316);林业科技创新平台运行补助项目(2016-LYPT-DW-069);国家旅游局旅游业青年专家培养计划(TYETP201548)

**收稿日期**:2017-04-05; **网络出版日期**:2018-01-26

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: csfuywd@hotmail.com

mapping approach to interpret the remote sensing images and obtain the land use/cover distribution maps. Then we analyzed the land use/cover dynamics and the landscape pattern evolution characteristics. We used the improved evaluation method for ecosystem service value based on per unit area to calculate the ecosystem service values in the study area for the three periods. We also analyzed the value changes and the spatio-temporal characteristics for each ecosystem service in every county. Finally, the driving mechanism behind the ecosystem evolution in the Beibu Gulf coastal areas was studied by combining population factors, economic factors, and tourism factors. The land use/cover changes showed that the scattered urban expansion caused the built-up land to increase dramatically and its fragmentation became more serious between 1999 and 2014. The destruction of the ecological environment damaged the mangrove forest. However, this damaged patch has disappeared and the degree of fragmentation has improved. The forestland and orchard areas increased between 1999 and 2006, but then decreased from 2006 to 2014, while the area of cultivated land decreased sharply between 1999 and 2014. The results of the ecosystem services assessment showed that the total value of the ecosystem services in the Beibu Gulf coastal areas increased over the whole study period, and reached about 54 million in 2014. The total value of the ecosystem services provided by the forest ecosystem was the highest, and accounted for 50% of the total value of the study area. In addition, 11 ecosystem service values were analyzed. The food production, gas regulation, and nutrient cycling service values decreased from 1999 to 2014, but other ecosystem service types showed an increasing trend. The results of driving mechanism analysis showed that the comprehensive urbanization rate (%) was an important driving factor behind the changes to the ecosystem service values in the Beibu Gulf coastal areas. However, the comprehensive urbanization rate in our study, which is equal to the proportion of the urban population to the total population, is a population structure index. Therefore, the regression models and comprehensive urbanization could reflect the regional economic structure, and that ecosystem services are closely related to social and economic development. This means that the reasonable regulation of economic structure can effectively enhance the value of regional ecosystem services.

**Key Words**: ecosystem service value (EVS); value equivalent factor; landscape spatial pattern; driving mechanism; Guangxi Beibu Gulf

剧烈人类活动影响下,全球气候环境及区域生态系统格局发生显著变化,生态系统服务功能的重要性日渐凸显[1-2]。区域结构特征是反映生态系统状态关键指标,合理量化生态系统服务并比较不同功能为人类提供的利益是当前研究的热点[3-4]。随着生态系统服务功能研究的不断深入,生态系统服务定量评估方法日趋成熟,常见的方法有条件价值法、影子工程法、市场机会法和资产价值法等[5-9]。谢高地等人提出的基于专家知识的生态系统服务价值评估法具有使用简便、数据需求少、结果可比性高、评估较全面等优点,作为快速评估工具被众多研究人员用以评估区域生态系统服务价值[10-11]。

2008 年我国提出将广西北部湾经济区建设成为重要国际区域经济合作区,这一定位对促进我国西部大开发、面向东盟开放合作和广西经济社会发展起到极大的推动作用。北部湾近海沿岸地区作为陆地和海洋相互作用区域,人类活动频繁、干扰强烈,是环境敏感地区和生态脆弱地区[12]。近年来,随着这一地区经济和城市化迅速发展,人口快速增长和资源过度消耗使得环境污染不断加剧,海水倒灌、植被退化和土地沙化等严峻的生态问题日渐涌现,已对北部湾经济区生态系统管理构成了严重的威胁[13-16]。但当前关于北部湾沿岸地区生态系统结构和功能演变的研究较少,快速的经济发展和剧烈的区域生态系统结构变化间的关系仍不清楚。因此,评估北部湾经济区沿岸地区生态系统服务功能并研究其演变特征及其驱动力,对促进北部湾经济区生态建设和可持续发展具有非常重要的意义。

为了解广西北部湾沿岸地区生态系统结构和功能变化规律,本文基于 Landsat 数据,通过 3S 技术获取北部湾沿岸地区 1999、2006 和 2014 年土地利用/覆盖分布图,并采用改进的单位面积价值当量法[17]估算研究区不同时期生态系统服务价值,分析生态系统服务价值的时空演变特征,揭示生态系统服务价值变化的主要

驱动因素,以期为北部湾沿岸地区土地资源的合理配置、生态环境保护和生态旅游开发提供科学依据。

## 1 研究区概况

广西北部湾沿岸地区濒临南海,东自洗米河口与广东接界,西至北仑河与越南分界,自东向西涵盖北海、钦州和防城港 3 个地级市。该区地处北回归线以南的低纬度地区,南濒热带海洋地区,受海洋性季风影响,属于热带季风气候。年均温在 20—26℃,年平均日照时间 1750—2650h,光照充足,终年温暖,常年多雨[12]。地势总体西高东低,从陆地向海洋倾斜,地理特征明显,沿海地形破碎,海岸曲折。沿海、沿疆、沿边的三重叠加,是北部湾与国内其他地区相比所具有的鲜明特征。现阶段主要以工业和第三产业为主导,由传统产业逐步向新型制造业和现代服务业转型,结构不断优化,特别是旅游类服务业增长迅速,使得该区域经济产值取得了跨越式发展。1999—2014 年间,研究区旅游人数从 1058.78 万人次增长到 2981.9 万人次,旅游收入从43.01亿元次增长到 750.24 亿元,A 级景区从 6 个增长到 34 个。

本文选取北海市的合浦县、银海区、铁山港区、海城区、钦州市的钦南区、防城港市的港口区、防城区和东兴市 8 个区县为研究区(图 1),总面积约 8840km$^2$,所有区县均有滨海的区位优势,且经济发展的战略地位突出。

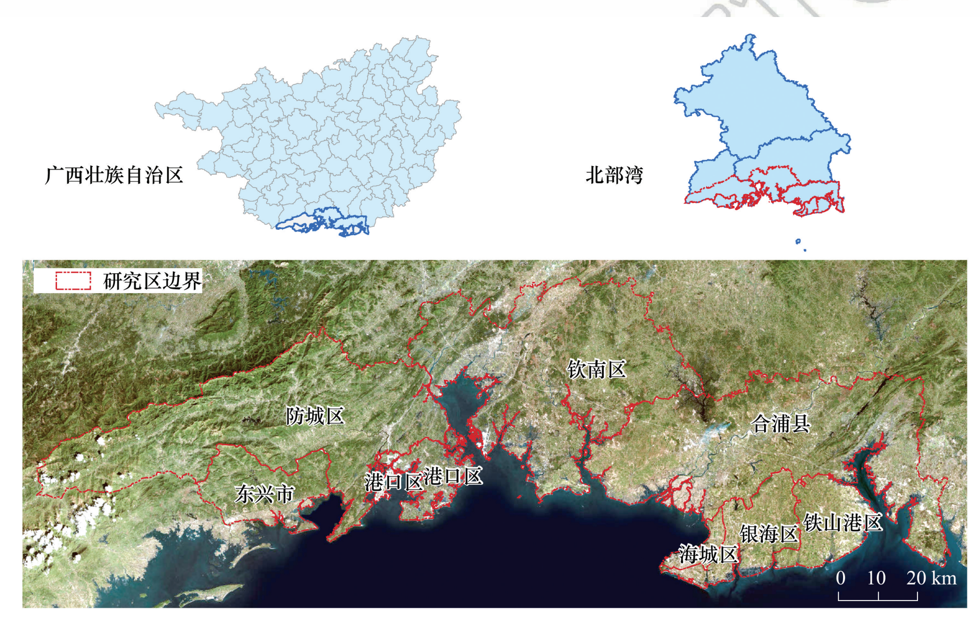



图 1 研究区位图

Fig.1 The study area

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源与处理

以时序 Landsat 卫星影像数据为基础数据,选择研究区 1999、2006 和 2014 年无云、生长季/非生长季的高质量影像,并配合 DEM(Digital Elevation Model)、土地利用现状图、森林清查成果、交通网络图等专题图为辅助数据[18]。

根据研究区地物特点,参照《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010—2007),将研究区土地利用/覆盖分为 8 大类:林地、果园、建设用地、耕地、水体、水产养殖用地、红树林和裸地。在 ENVI 软件支持下,采用监督分类结合人工目视矫正,完成 3 期遥感影像解译。精度验证结果表明 3 个时期的分类精度分别为 85.63%、85.27%和 89.96%,满足研究需求。

### 2.2 生态服务价值评估

生态系统服务功能概念被提出后不断深化和发展,而千年生态系统评估(*MA*, Millennium Ecosystem Assessment)的定义使用最为广泛[19-21]。为量化生态系统服务功能,将研究区土地利用类型合并为六大生态系统(表1),参考谢高地等2015年提出的最新研究成果[17],评估北部湾沿岸地区的生态系统服务价值。生态系统服务由供给、调节、支持和文化四大类构成,在此基础上划分为11小类,各生态系统的单位面积生态系统服务价值当量见表1,标准当量因子的生态系统服务价值量为3406.5元/hm$^2$[17]。

**表1　单位面积生态系统服务价值当量**

**Table 1　Ecosystem service equivalent value per unit area**

| 生态系统类型 Ecosystem | | 农田 Farmland | 森林 Forest | | 湿地 Wetland | 水域 Water | 荒漠 Desert | 城市 Urban |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 土地利用类型 Land use type | | 耕地 Cultivated land | 林地 Forestland | 果园 Orchard | 水产养殖/红树林 Aquaculture & Mangrove | 水体 Water | 裸地 Bare land | 建设用地 Built-up land |
| 供给 Supply | 食物生产 | 1.36 | 0.29 | 0.19 | 0.51 | 0.8 | 0 | 0 |
| | 原料生产 | 0.09 | 0.66 | 0.43 | 0.5 | 0.23 | 0 | 0 |
| | 水源供给 | −2.63 | 0.34 | 0.22 | 2.59 | 8.29 | 0 | 0 |
| 调节 Regulation | 气体调节 | 1.11 | 2.17 | 1.41 | 1.9 | 0.77 | 0.02 | 0 |
| | 气候调节 | 0.57 | 6.5 | 4.23 | 3.6 | 2.29 | 0 | 0 |
| | 净化环境 | 0.17 | 1.93 | 1.28 | 3.6 | 5.55 | 0.1 | 0 |
| | 水文调节 | 2.72 | 4.74 | 3.35 | 24.23 | 102.24 | 0.03 | 0 |
| 支持 Support | 土壤保持 | 0.01 | 2.65 | 1.72 | 2.31 | 0.93 | 0.02 | 0 |
| | 维持养分循环 | 0.19 | 0.2 | 0.13 | 0.18 | 0.07 | 0 | 0 |
| | 生物多样性 | 0.21 | 2.41 | 1.57 | 7.87 | 2.55 | 0.02 | 0 |
| 文化 Culture | 美学景观 | 0.09 | 1.06 | 0.69 | 4.73 | 1.89 | 0.01 | 0 |

### 2.3 驱动指标体系

生态系统服务价值演变的驱动包括自然环境和人文影响两方面[22],短时间内生态系统演变主要是人文驱动影响。参考相关研究[11, 23],收集人口指标、经济指标和旅游指标3方面的人文驱动因子(表2)。所有指标都是按照区县为单位进行收集,涵盖了1999、2006和2014年3个时期,部分数据存在缺项,但不影响后续研究分析。

**表2　生态系统服务价值演变驱动力指标体系**

**Table 2　Index system of ecosystem service value change driving force**

| 驱动因子 Driving factor | 变量:指标(单位) Variable name: Indicator (unit) |
|---|---|
| 人口指标 Demographic indicators | $x_1$:总人口(人);$x_2$:城镇人口(人);$x_3$:农村人口(人);$x_4$:少数民族人口(人);$x_5$:人口增长率(%);$x_6$:人口密度(人/km$^2$);$x_7$:综合城镇化率(%) |
| 经济指标 Economic indicators | $x_8$:GDP总量(亿元);$x_9$:人均GDP(元);$x_{10}$:第一产总产值(亿元);$x_{11}$:第二产总产值(亿元);$x_{12}$:第三产总产值(亿元);$x_{13}$:农民人均纯收入(元);$x_{14}$:农业产业值(万元);$x_{15}$:林业总产值(万元);$x_{16}$:牧业总产值(万元);$x_{17}$:渔业总产值(万元) |
| 旅游指标 Tourism indicators | $x_{18}$:旅游总人数(万人);$x_{19}$:境内游客(万人);$x_{20}$:境外游客(万人);$x_{21}$:旅游年收入(万元);$x_{22}$:国内旅游总收入(万元);$x_{23}$:入境旅游外汇收入(万元);$x_{24}$:酒店个数(个);$x_{25}$:景点个数(个) |

## 3 结果与分析

### 3.1 生态系统变化

#### 3.1.1 生态系统总面积变化

1999—2014 年,农田和森林是研究区最主要的生态系统,且耕地、林地和果园面积变化显著(表 3)。1999 年和 2006 年研究区耕地面积最大,具有景观基质特性,其次是果园、林地。2014 年果园面积达 2720.13km$^2$,而耕地面积仅为 2636.67km$^2$,景观基质发生变化,果园成为该区域景观基质,其次是耕地、林地、建设用地、水体、水产养殖、裸地,红树林面积最小。从面积变化率来看,建设用地变化率最高,说明研究区城市扩张、经济发展速度较快。红树林、耕地、裸地的面积不断减少,红树林消失情况最为严重,说明生态环境恶化加剧了天然湿地生态系统退化。

**表 3 1999—2014 年间北部湾沿岸地区各生态系统面积变化**

**Table 3 Area changes of different ecosystem types in the study area from 1999 to 2014**

| 生态系统类型 Ecosystem | | 农田 Farmland | 森林 Forest | | 湿地 Wetland | | 水域 Water | 荒漠 Desert | 城市 Urban |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 土地利用类型 Land use type | | 耕地 Cultivated land | 林地 Forestland | 果园 Orchard | 水产养殖 Aquaculture | 红树林 Mangrove | 水体 Water | 裸地 Bare land | 建设用地 Built-up land |
| 1999 年 | km$^2$ | 3678.80 | 1525.38 | 2553.95 | 249.31 | 80.38 | 290.43 | 341.46 | 122.40 |
| | % | 41.61 | 17.25 | 28.88 | 2.82 | 0.91 | 3.28 | 3.86 | 1.38 |
| 2006 年 | km$^2$ | 2761.08 | 1923.88 | 2725.06 | 391.93 | 49.19 | 299.39 | 377.83 | 310.66 |
| | % | 31.24 | 21.77 | 30.83 | 4.43 | 0.56 | 3.39 | 4.27 | 3.51 |
| 2014 年 | km$^2$ | 2636.67 | 1915.22 | 2720.13 | 314.19 | 13.07 | 364.49 | 282.26 | 595.73 |
| | % | 29.82 | 21.66 | 30.76 | 3.55 | 0.15 | 4.12 | 3.19 | 6.74 |
| 1999—2006 | km$^2$ | -917.72 | 398.50 | 171.11 | 142.62 | -31.19 | 8.96 | 36.37 | 188.26 |
| | % | -24.95 | 26.12 | 6.70 | 57.21 | -38.80 | 3.08 | 10.65 | 153.81 |
| 2006—2014 | km$^2$ | -124.41 | -8.66 | -4.93 | -77.74 | -36.12 | 65.10 | -95.57 | 285.07 |
| | % | -4.51 | -0.45 | -0.18 | -19.84 | -73.43 | 21.74 | -25.29 | 91.76 |
| 1999—2014 | km$^2$ | -1042.13 | 389.84 | 166.18 | 64.88 | -67.31 | 74.05 | -59.20 | 473.33 |
| | % | -28.33 | 25.56 | 6.51 | 26.02 | -83.74 | 25.50 | -17.34 | 386.71 |

#### 3.1.2 生态系统空间分布与格局变化

1999—2014 年北部湾沿岸地区各类生态系统总量变化剧烈,但其空间分布特征并未显著改变。总体来看,林地主要分布在西部,耕地主要分布在东部,水体主要分布在南部,果园则镶嵌在整个区域内(图 2)。各区县生态系统类型分布差异显著,可分为 3 类:(1)以海城区代表的城市生态系统景观,1999 年建设用地面积 49.64km$^2$,且随着时间推移面积不断增加,2014 年达到 58.82km$^2$,占海城区面积的 63.26%。(2)以合浦县、钦南区、港口区、银海区和铁山港区为代表的典型农业生态系统景观,耕地和果园是主要景观基底,水果的较高经济效益造成 1999—2014 年间耕地向果园转变情况严重。(3)以东兴区和防城区为代表的典型农林复合景观,林地面积最大,其次为果树和耕地,生态工程实施使该区域高海拔、陡坡地区的果树和耕地转变为林地。

生态系统的格局特征决定区域生态过程,而生态系统服务功能受区域生态过程调控,因此景观格局指数被用来分析北部湾沿岸地区生态系统的格局变化[24-26]。斑块密度(*PD*, Patch Density)可描述各类生态系统的破碎化程度[27],建设用地 *PD* 持续增长(表 4),说明该区域城市呈现爆发式扩张,但并非摊大饼式扩张,而是比较分散的建设,使其破碎化越来越严重。耕地和林地破碎化程度先增大后减小,说明耕地斑块以零星状态减少,而林地斑块以零星状态增长。果园斑块数量虽然较多,但持续减少,且 *PD* 最大但持续减小,而果园面积在 1999—2014 年间有所增加,说明果园是成片变化,新增斑块使果园形成更大的斑块,从而降低其破碎

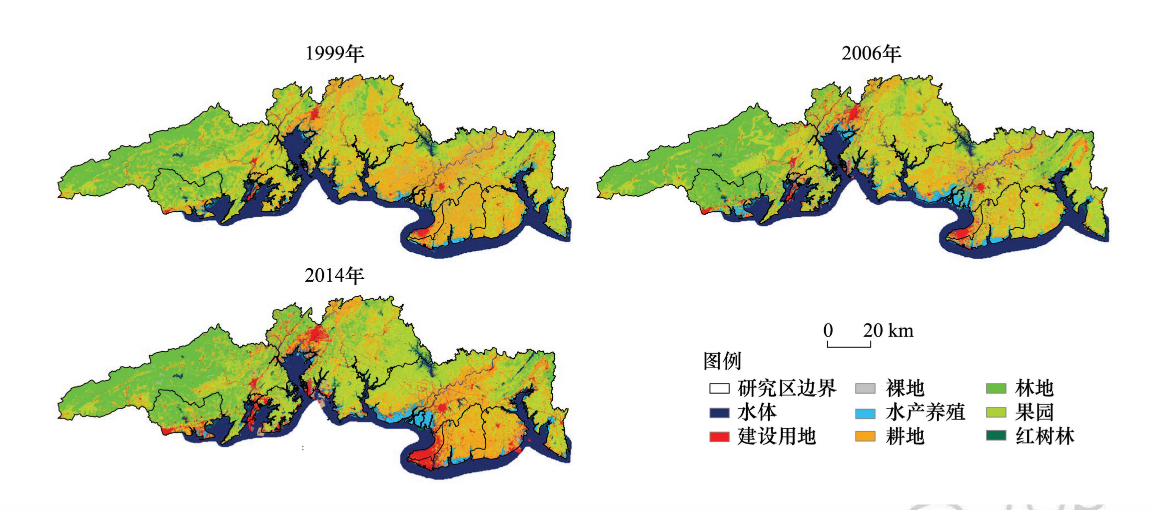



图 2　北部湾沿岸地区 3 期生态系统分布图

Fig.2　The ecosystem types distribution in study area for years of 1999, 2006 and 2014

化程度。红树林的 *PD* 变化趋势与果园相似,但其面积不断减少,说明红树林成片消失使得破碎度减小。散布与并列指数(IJI, Interspersion and Juxtaposition Index)可反映各类景观的散布与并列程度[27],从表 5 得知水产养殖用地具有零散分布的特点,其 IJI 最大。红树林的 IJI 呈现小幅增加后大幅减少的趋势,说明初始阶段红树林分布比较零散,后来随着面积减少而比较集中。林地的 IJI 呈现先大幅增加后小幅增加的持续增长趋势,说明初始状态林地比较集中,随着森林面积的增加其分散程度也在不断加大。其他类型的 IJI 变化幅度较小,且均在 70 左右,说明这些类型在空间分布上较分散。

表 4　1999—2014 年间各景观类型斑块密度变化

Table 4　Changes of *PD* of different ecosystem types from 1999 to 2014

| 斑块密度 Patch Density (*PD*) | 耕地 Cultivated land | 林地 Forestland | 果园 Orchard | 水产养殖 Aquaculture | 红树林 Mangrove | 水体 Water | 裸地 Bare land | 建设用地 Built-up land |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1999 年 | 2.34 | 0.87 | 3.64 | 0.49 | 1.13 | 0.54 | 2.26 | 0.41 |
| 2006 年 | 2.90 | 1.49 | 3.24 | 0.29 | 0.72 | 0.57 | 1.86 | 1.27 |
| 2014 年 | 2.76 | 0.89 | 2.49 | 0.68 | 0.25 | 1.10 | 1.44 | 2.17 |

表 5　1999—2014 年间各景观类型散布与并列指数变化

Table 5　Changes of IJI of different ecosystem types from 1999 to 2014

| 散布与并列指数 Interspersion and Juxtaposition Index (IJI) | 耕地 Cultivated land | 林地 Forestland | 果园 Orchard | 水产养殖 Aquaculture | 红树林 Mangrove | 水体 Water | 裸地 Bare land | 建设用地 Built-up land |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1999 年 | 55.29 | 35.16 | 49.86 | 75.77 | 76.62 | 79.39 | 44.91 | 72.21 |
| 2006 年 | 60.24 | 54.39 | 49.07 | 90.26 | 79.56 | 90.76 | 66.40 | 80.20 |
| 2014 年 | 65.50 | 56.42 | 61.48 | 74.60 | 64.58 | 90.92 | 74.20 | 75.27 |

景观水平选择斑块密度(*PD*, Patch Density)、景观形状指数(LSI, Landscape Shape Index)、蔓延度指数(CONTAG, Contagion Index)、景观聚集度指数(COHESION, Patch Cohesion Index)、香农多样性指数(SHDI, Shannon′s Diversity Index)5 个指标[28-29]来分析北部湾沿岸地区生态系统格局动态(表 6)。*PD* 呈现出先增大后减小趋势,说明人类活动影响下研究区景观总破碎度呈现先增大后减小的趋势,且 2014 年破碎程度比 1999 年大。1999 年和 2006 年的 LSI 差异较小,而 2006—2014 年的 LSI 大幅减小,说明人类对土地的不断开发和利用使景观形状越来越简单。CONTAG 变化趋势说明景观蔓延度先减小后增大,但 2006 年和 2014 年间

的差异较小。COHESION 持续减小,变化幅度小,说明人类活动虽然使各生态系统类型和斑块大小发生了转变,但整个景观的团聚程度变化不显著。1999—2014 年间 SHDI 先增大后不变,说明北部湾沿岸地区在城市发展过程中各生态系统的分布越来越均匀。

表 6 北部湾沿岸地区景观水平景观格局指数

Table 6 Landscape index analysis of landscape level in study area

| 年份 Year | 斑块密度 *PD* | 景观形状指数 Landscape Shape Index (LSI) | 蔓延度指数 Contagion Index (CONTAG) | 景观聚集度指数 Patch Cohesion Index (COHESION) | 香农多样性指数 Shannon's Diversity Index (SHDI) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1999 | 11.69 | 216.46 | 46.14 | 99.60 | 1.62 |
| 2006 | 12.34 | 216.24 | 42.83 | 99.35 | 1.73 |
| 2014 | 11.77 | 191.17 | 43.40 | 99.31 | 1.73 |

## 3.2 生态系统服务价值变化

### 3.2.1 生态系统服务价值总量变化

1999—2014 年北部湾沿岸地区生态系统服务功能总价值由 $4.83\times10^{10}$ 元增加到 $5.40\times10^{10}$ 元(表 7)。森林生态系统服务总价值最高,超过研究区总价值的 50%。水域的生态系统服务总价值较高,且持续增大;湿地生态系统服务功能总价值先增大后减小,整体小幅减少 0.74%。农田生态系统服务总价值不断减小,1999—2014 年间由 $4.87\times10^{9}$ 元减小到 $3.49\times10^{9}$ 元。虽然耕地面积较大,但农田生态系统服务总价值较小;而水域面积最小,但其生态系统服务总价值较大;森林生态系统服务总价值最大,说明其是北部湾沿岸地区非常重要的生态系统。

表 7 1999—2014 年间北部湾沿岸地区各类生态系统服务价值及变化

Table 7 Ecosystem service value changes of different ecosystem in study area from 1999 to 2014

| 生态系统 Ecosystem | 生态系统服务价值 Ecosystem service value/元 | | | 变化率 Change percentage/% | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1999 年 | 2006 年 | 2014 年 | 1999—2006 | 2006—2014 | 1999—2014 |
| 农田 Farmland | $4.87\times10^{9}$ | $3.66\times10^{9}$ | $3.49\times10^{9}$ | −24.95 | −4.51 | −28.33 |
| 森林 Forest | $2.52\times10^{10}$ | $2.92\times10^{10}$ | $2.91\times10^{10}$ | 15.90 | −0.32 | 15.53 |
| 湿地 Wetland | $5.84\times10^{9}$ | $7.82\times10^{9}$ | $5.80\times10^{9}$ | 33.80 | −25.81 | −0.74 |
| 水域 Water | $1.24\times10^{10}$ | $1.28\times10^{10}$ | $1.56\times10^{10}$ | 3.08 | 21.74 | 25.50 |
| 荒漠 Desert | $2.33\times10^{7}$ | $2.57\times10^{7}$ | $1.92\times10^{7}$ | 10.65 | −25.29 | −17.34 |
| 城市 Urban | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 总价值 Total | $4.83\times10^{10}$ | $5.35\times10^{10}$ | $5.40\times10^{10}$ | 10.65 | 0.94 | 11.69 |

### 3.2.2 生态系统服务价值类型间变化

1999—2014 年间除食物生产、气体调节和维持养分价值有所减少外,其他服务类型的价值均呈现增长趋势(表 8)。从供给服务组成上来看,食物生产和原料生产价值为正,农田生态系统耗水使得水源供给为负。随着农田生态系统向森林生态系统演变,食物生产价值减少,原料生产和水源供给价值增加。从调节服务组成上来看,水文调节价值最高,净化环境价值最低。随着生态系统演变,特别是森林生态系统和水域面积的增加,水文调节价值不断增大,而气体调节、气候调节和净化环境价值先增大后减小,1999—2014 年气体调节价值减少了 $8.61\times10^{6}$ 元。从支持服务组成来看,生物多样性和土壤保持价值较大,且呈现先增大后减小的变化趋势;而维持养分价值较小,且持续减小。文化服务只有美学景观一项,随着北部湾沿岸地区生态系统演变,美学景观价值先增大后减小,因为 2006 年以后不合理的开发降低了该区域的文化服务功能。总体来看,调节服务价值比例最高,变化量最大,而文化服务价值比例最低,变化量最小。

### 3.2.3 生态系统服务价值空间变化

分析单位面积生态系统服务价值(图 3),北部湾各区县面积和生态系统构成差异较大,可按区县平均生

态系统服务水平分为两类:(1)以东兴市为代表的平均服务水平较高的区县,(2)以海城区为代表的平均服务水平较低的区县。高服务水平的区县中,东兴市单位面积生态系统服务价值最大,经济发展促使耕地、林地向果园转变使得该区域生态服务价值呈增大后较小的趋势。合浦县、防城区、钦南区和港口区单位面积服务价值较大,但前三个区县从 1999—2014 年间不断增大,港口区却有减小趋势。低服务水平的区县中,海城区单位面积生态系统服务价值最小,且持续减小。而铁山港区和银海区是典型的农业景观区县,单位面积服务价值较小,呈小幅波动。

**表 8　1999—2014 年间北部湾沿岸地区各类型生态系统服务价值变化**

**Table 8　Ecosystem service value changes of different service in study area from 1999 to 2014/元**

| 生态系统服务类型 Types of ecosystem services | 生态系统价值 ecosystem service value | | | 服务价值变化 Change of ecosystem service value | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1999 | 2006 | 2014 | 1999—2006 | 2006—2014 | 1999—2014 |
| 食物生产 Food production | $2.16×10^9$ | $1.80×10^9$ | $1.74×10^9$ | $-3.53×10^8$ | $-6.09×10^7$ | $-4.14×10^8$ |
| 原料生产 Raw material production | $9.09×10^8$ | $1.01×10^9$ | $9.94×10^8$ | $1.06×10^8$ | $-2.08×10^7$ | $8.54×10^7$ |
| 水源供给 Water supply | $-1.82×10^9$ | $-8.12×10^8$ | $-6.19×10^8$ | $1.00×10^9$ | $1.93×10^8$ | $1.20×10^9$ |
| 气体调节 Gas regulation | $4.04×10^9$ | $4.14×10^9$ | $4.03×10^9$ | $1.04×10^8$ | $-1.13×10^8$ | $-8.61×10^6$ |
| 气候调节 Climate regulation | $8.40×10^9$ | $9.50×10^9$ | $9.36×10^9$ | $1.09×10^9$ | $-1.39×10^8$ | $9.55×10^8$ |
| 净化环境 Purify environment | $3.29×10^9$ | $3.73×10^9$ | $3.70×10^9$ | $4.38×10^8$ | $-3.49×10^7$ | $4.03×10^8$ |
| 水文调节 Hydrological regulation | $2.16×10^{10}$ | $2.28×10^{10}$ | $2.40×10^{10}$ | $1.22×10^9$ | $1.19×10^9$ | $2.41×10^9$ |
| 土壤保持 Soil conservation | $3.24×10^9$ | $3.79×10^9$ | $3.71×10^9$ | $5.48×10^8$ | $-8.08×10^7$ | $4.67×10^8$ |
| 维持养分循环 Nutrient cycling | $4.82×10^8$ | $4.65×10^8$ | $4.50×10^8$ | $-1.76×10^7$ | $-1.43×10^7$ | $-3.19×10^7$ |
| 生物多样性 Biological diversity | $4.02×10^9$ | $4.68×10^9$ | $4.41×10^9$ | $6.60×10^8$ | $-2.68×10^8$ | $3.92×10^8$ |
| 美学景观 Aesthetic landscape | $1.98×10^9$ | $2.32×10^9$ | $2.17×10^9$ | $3.41×10^8$ | $-1.50×10^8$ | $1.91×10^8$ |

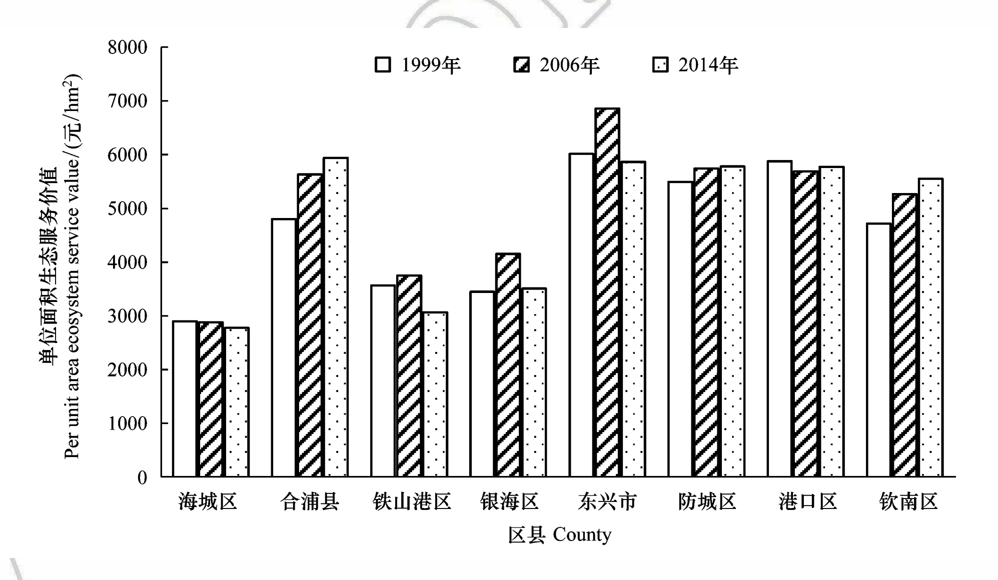



**图 3　不同年份各区县单位面积生态系统服务价值**

**Fig.3　Per unit area ecosystem service value (Yuan/hm$^2$) of each county for years of 1999, 2006 and 2014**

以 1km×1km 网格为单位统计并分析 1999—2014 年间生态系统服务价值总量变化(图 4)可知,较高 ESV (Ecosystem Service Value) 区域主要分布在研究区西部,而较低 ESV 区域主要分布在海城区周围。1999—2006 年间 ESV 减少的区域比较分散,ESV 增加的区域主要是合浦县耕地转变为果园的区域;2006—2014 年间 ESV 减少的区域主要集中在城市开发区域,高经济效益的水果刺激让更多的耕地转变为果园,因此合浦县和钦南区连片耕地 ESV 提升。

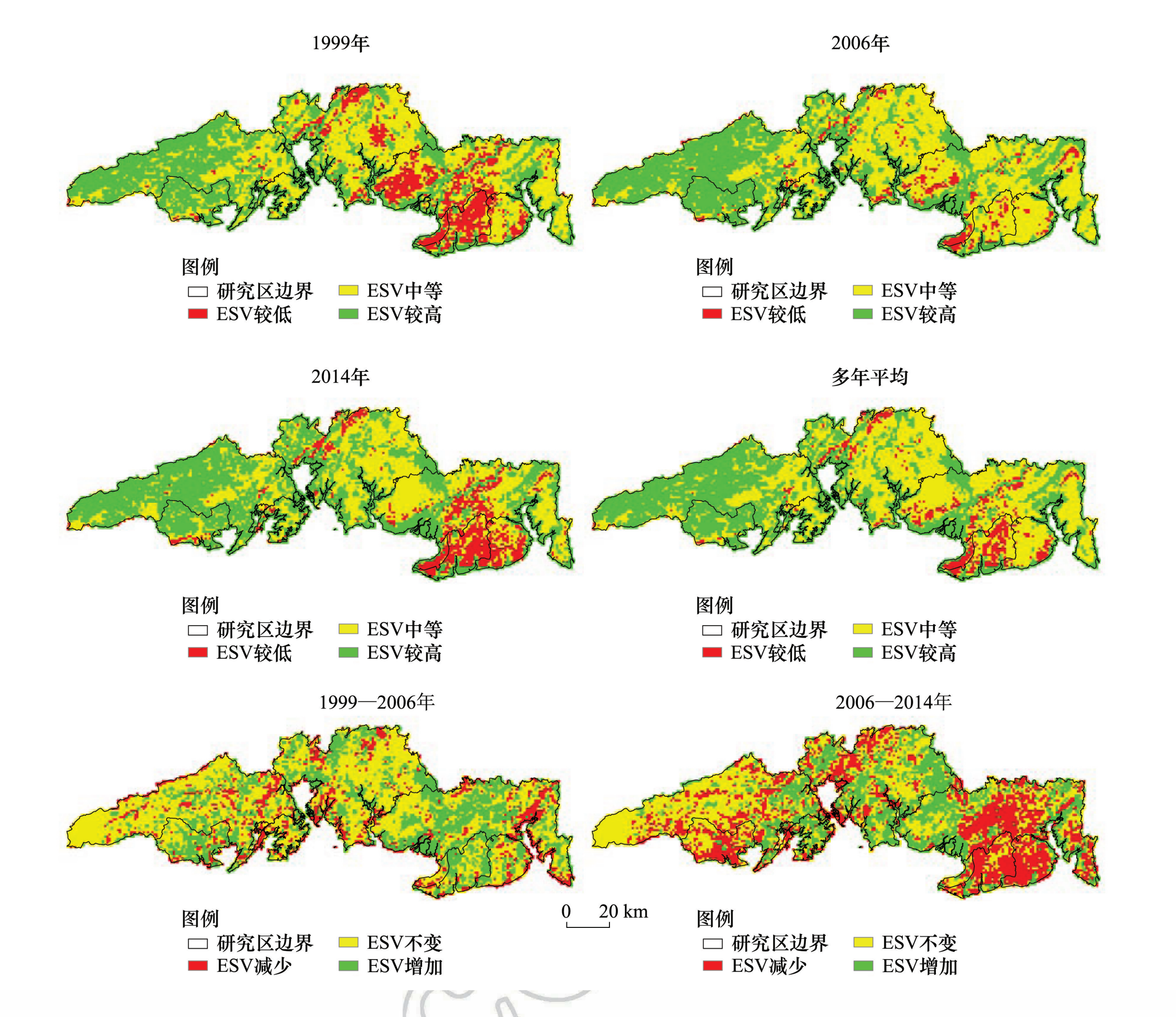



图 4 1999—2014 年间北部湾 1km×1km 网格内生态系统服务价值变化

Fig.4 Ecosystem service value change of the fishnet with 1km × 1km from 1999 to 2014

### 3.3 生态系统服务价值变化驱动力

利用 1999—2014 年间北部湾各区县生态系统服务价值和对应驱动指标进行相关分析,剔除相关性较低的因子并进行逐步回归分析(表 9)。供给服务价值仅有一个回归方程,且自变量为人口密度,其他生态系统

表 9 北部湾沿岸地区生态系统服务价值回归模型

Table 9 Ecosystem service value regression models of each service in the study area

| 生态服务价值类型/元 Ecosystem service value category | 回归模型 Regression model |
|---|---|
| 生态系统服务总价值 Total value | (1) $y = -1.453\times10^{8}x_7 + 1.127\times10^{10}$ |
| | (2) $y = -2.273\times10^{8}x_7 + 7.996\times10^{5}x_{13} + 9.743\times10^{9}$ |
| 供给服务价值 Supply value | $y = -1.759\times10^{5}x_6 + 3.102\times10^{8}$ |
| 调节服务价值 Regulation value | (1) $y = -1.104\times10^{7}x_7 + 8.596\times10^{9}$ |
| | (2) $y = -1.901\times10^{8}x_7 + 2.226\times10^{7}x_8 + 9.408\times10^{9}$ |
| 支持服务价值 Support vuale | (1) $y = -2.434\times10^{7}x_7 + 1.857\times10^{9}$ |
| | (2) $y = -3.061\times10^{7}x_7 + 10215.971\ x_{15} + 1.776\times10^{9}$ |
| 文化服务价值 Culture value | (1) $y = -6.182\times10^{6}x_7 + 4.744\times10^{8}$ |
| | (2) $y = -9.441\times10^{6}x_7 + 31758.96\ x_{13} + 4.128\times10^{8}$ |

表中,$y$:服务价值(元);$x_7$:综合城镇化率(%);$x_{13}$:农民人均纯收入(元);$x_6$:人口密度(人/km$^2$);$x_8$:GDP 总量(亿元);$x_{15}$:林业生产总值(万元)

服务价值均有两个回归方程,且最终自变量均为综合城镇化率。而本文中的综合城镇化率为城镇人口占总人口的比例,属于人口结构指标,人口结构的变化会导致区域经济、生态结构变化,最终影响北部湾沿岸地区生态系统服务功能。人口密度反映了各区县人口分布状况,可能会影响区域生态系统数量及聚集、破碎等空间分布特征从而改变区域生态系统供给功能。

分析生态系统服务总价值、调节服务价值、支持服务价值和文化服务价值得知,农民人均纯收入是生态系统服务总价值和文化服务价值第二重要的驱动因子,农民人均纯收入能描述生活水平、社会福利,当农民人均纯收入较高时文化服务需求才会提高,因为提升了文化服务价值和生态系统服务总价值。GDP 总量是调节服务价值第二重要驱动因子,说明区域生态系统调节服务功能受区域经济发展的影响。林业生产总值是支持服务价值第二重要的驱动因子,突出了森林生态系统在支持服务上的重要性。

## 4　讨论

### 4.1　生态服务价值评估方法

改进的当量因子法虽然是一种静态的评估方法,使用简单、数据需求少,特别适用于区域尺度生态系统服务价值的评估[17]。此外,当量因子法计算的生态系统服务价值能有效反应区域时空动态,可以满足北部湾沿岸地区生态系统服务价值在时间和空间上动态变化的研究[11]。

北部湾滨海,虽然研究区范围内水域面积较小,但其生态系统服务价值总量仅次于森林生态系统,这可能是谢高地等最新研究成果[17]中极大的提升了水域的生态系统服务价值当量,特别是水源供给和水文调节价值量。改进后的价值当量评估方法将生态系统进行二级划分,且修正了多项服务价值,但在水域的生态系统服务价值是否存在高估的可能性,还有待进一步探讨。此外,虽然水田在进行粮食生产过程中会消耗大量水,但区域尺度下水稻用水量的分配及耗水机理仍不清晰[30],农田生态系统的水源供给价值可能过分低估。

### 4.2　生态系统空间分布与演变

生态系统服务功能空间分布(3.1.1 节)与生态系统空间分布(3.2.2 节)存在联系,也有显著差异。海城区是典型的城市生态系统,单位面积服务价值最小,却与铁山港区、银海区这种典型农业景观的区县的生态系统服务能力相差不大,都在 40000 元/$hm^2$左右。铁山港区和银海区农业生产用地以水田为主,其对水资源的需求使得水源供给为负值,降低了区县平均生态系统服务水平。东兴市、防城区是典型的森林生态系统为主要的区县,但单位面积服务价值却与合浦县、海城区和钦南区这种农业生态系统为主的区县相近。合浦县、海城区和钦南区有大面积的果园,其生态服务能力介于森林和农田之间,能提升区县平均生态系统服务水平。

1999—2014 年间,城市扩张使建设用地不断增加,生态系统服务总价值也不断增加。从各类生态系统服务价值变化来看,仅有森林生态系统和水域的服务价值有增长,而其他生态系统的服务价值均有减小,其中农田生态系统服务价值减小得最多。北部湾沿岸地区生态系统服务总价值的增长可能得益于耕地向果园和林地的转变,使北部湾沿岸地区的生态系统从以农田为主导变为以森林为主导。因此,快速城镇化的同时保障退耕还林等生态工程的实施可有效提升区域生态系统服务功能。

### 4.3　生态系统服务演变驱动

生态系统服务价值是生态系统服务功能的直接体现[31],本文采用改进的价值当量法来评估服务价值,价值的变化能有效反映北部湾沿岸地区生态系统服务功能的演变。驱动机制有定性和定量两种研究方法,定性研究仅将收集的数据进行简单的趋势分析后通过文字的形式描述[29],而定量研究通过数学分析方法找到生态系统服务价值演变的原因及其与相关因子间的关系,但模型的解释性不如定性分析,且数据获取性较差。

本研究的数据均由相关部门提供,通过相关分析和主成分分析剔除存在共线性以及与生态系统服务无关的数据后,选取较关键的 25 个指标对区县各类生态系统服务价值进行逐步回归分析,模型及相关待估参数均达到显著水平,结果显示综合城镇化率是主导北部湾沿岸地区生态系统服务价值变化的驱动因素。逐步回归得知农民人均纯收入、GDP 总量和林业生产总值是影响北部湾沿岸地区生态系统服务价值的重要因素。虽

然模型的精度较高,但区域条件的限制性使得该统计模型使用受限。近年来北部湾发展的产业调整、生态保护等相关政策措施难以量化,但政策措施无疑是促使该区域经济发展的关键因素。科学定量化生态系统服务价值并权衡生态系统服务需求[32],为景观调控方案制定提供依据,推进生态旅游开发,实现生态与经济协调发展将是北部湾沿岸地区是未来研究的重点。

## 5 结论

掌握生态系统结构及其功能的时空变化规律是开展科学生态系统管理的重要前提,如何衡量人类在满足自我需求的同时对自然资源和生态系统服务功能的改变程度是当前研究值得关注的一个问题。本文分析了从 1999—2014 年北部湾沿岸地区生态系统格局动态,并进一步对该区域生态系统服务价值的时空演变特征及其驱动机制进行了研究。结果表明:

(1)1999—2014 年,城市点状、离散扩张使得城市生态系统面积增加了 473.33km$^2$,破碎化程度加剧;生态环境的破坏给湿地生态系统带来毁灭性的破坏,红树林不断消失,2014 年仅存 13.07km$^2$,破碎度增加;林地和果园的面积呈现先增加后减小趋势,但林地呈零星状增长,破碎化程度增高,果园则与之相反。耕地面积急剧缩减,破碎化程度先增大后减小,说明耕地斑块以零星状态减少。

(2)生态系统服务总价值不断增长,2014 年高达为 5.40×10$^{10}$元。生态系统构成中,森林生态系统服务价值最高,约占研究区总价值的 50%,且呈增长趋势;生态系统服务构成中,除食物生产、气体调节和维持养分循环价值有所减少外,其他类型生态系统服务价值均呈增长趋势。虽然生态系统类型在空间分布存在显著差异,但以城市生态系统为主的海城区和以农田生态系统为主的铁山港区、银海区的平均生态系统服务水平差异较小,而以森林生态系统主的区县与以农林(农田-经济林)生态系统为主的区县的平均生态系统服务水平差异较小。

(3)驱动力分析表明,综合城镇化率是影响北部湾沿岸地区生态系统服务价值变化的重要驱动因素,说明区域生态系统服务价值与社会经济发展相互耦合,科学定量化研究区域生态系统服务价值演变驱动机制依然是未来研究的重点。

**参考文献(References):**

[1] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.
[2] Wong C P, Jiang B, Kinzig A P, Lee K N, Ouyang Z Y. Linking ecosystem characteristics to final ecosystem services for public policy. Ecology Letters, 2015, 18(1): 108-118.
[3] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. Ecological Economics, 2009, 68(3): 643-653.
[4] Hou Y, Li B, Müller F, Chen W P. Ecosystem services of human-dominated watersheds and land use influences: a case study from the Dianchi Lake watershed in China. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(11): 652.
[5] 王玉涛, 郭卫华, 刘建, 王淑军, 王琦, 王仁卿. 昆嵛山自然保护区生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2009, 29(1): 523-531.
[6] 郑伟, 沈程程, 乔明阳, 石洪华. 长岛自然保护区生态系统维护的条件价值评估. 生态学报, 2014, 34(1): 82-87.
[7] 江波, 张路, 欧阳志云. 青海湖湿地生态系统服务价值评估. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3137-3144.
[8] Egoh B, Reyers B, Rouget M, Richardson D M, Le Maitre D C, van Jaarsveld A S. Mapping ecosystem services for planning and management. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 127(1/2): 135-140.
[9] Zhang J Y, Ma K M, Fu B J. Wetland loss under the impact of agricultural development in the Sanjiang Plain, NE China. Environmental Monitoring & Assessment, 2010, 166(1/4): 139-148.
[10] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
[11] 曾杰, 李江风, 姚小薇. 武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征. 应用生态学报, 2014, 25(3): 883-891.
[12] 陈作志, 蔡文贵, 徐姗楠, 黄梓荣, 邱永松. 广西北部湾近岸生态系统风险评价. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2977-2986.
[13] 郑挺, 林元烧, 曹文清, 张文静, 郑连明, 王宇杰, 杨位迪. 北部湾北部生态系统结构与功能——浮游动物空间生态位及其分化. 生态学报, 2014, 34(13): 3635-3649.

[14] 刘亚萍, 金建湘, 周武生, 赫雪姣. 环境价值评估中的 WTP 值和 WTA 值测算与非对称性——以广西北部湾经济区滨海生态环境保护为例. 生态学报, 2015, 35(9): 2870-2879.

[15] 杨静, 张仁铎, 赵庄明, 翁士创, 李凤华. 近 25 年广西北部湾海域营养盐时空分布特征. 生态环境学报, 2015, 24(9): 1493-1498.

[16] Zheng Q, Zhang R J, Wang Y H, Pan X H, Tang J H, Zhang G. Occurrence and distribution of antibiotics in the Beibu Gulf, China: impacts of river discharge and aquaculture activities. Marine Environmental Research, 2012, 78: 26-33.

[17] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.

[18] 黄春波, 佃袁勇, 周志翔, 王娣, 陈瑞冬. 基于时间序列统计特性的森林变化监测. 遥感学报, 2015, 19(4): 657-668.

[19] Holzkämper A, Lausch A, Seppelt R. Optimizing landscape configuration to enhance habitat suitability for species with contrasting habitat requirements. Ecological Modelling, 2006, 198(3/4): 277-292.

[20] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. Ecological Complexity, 2013, 15: 114-121.

[21] 税伟, 陈毅萍, 苏正安, 范水生. 专业化茶叶种植影响下的农业生态系统服务功能价值评价——以福建省安溪县为例. 生态学报, 2017, 37(10): 3311-3326.

[22] Wang S X, Wu B, Yang P N. Assessing the changes in land use and ecosystem services in an oasis agricultural region of Yanqi Basin, Northwest China. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(12): 8343-8357.

[23] Li T H, Li W K, Qian Z H. Variations in ecosystem service value in response to land use changes in Shenzhen. Ecological Economics, 2010, 69(7): 1427-1435.

[24] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. 生态学报, 2008, 28(11): 5521-5531.

[25] 刘常富, 李京泽, 李小马, 何兴元, 陈玮. 基于模拟景观的城市森林景观格局指数选取. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1125-1131.

[26] Huang C B, Zhou Z X, Wang D, Dian Y Y. Monitoring forest dynamics with multi-scale and time series imagery. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(5): 273-273.

[27] 赵志轩, 张彪, 金鑫, 翁白莎, 严登华, 鲍淑君. 海河流域景观空间梯度格局及其与环境因子的关系. 生态学报, 2011, 31(7): 1925-1935.

[28] 贾军梅, 罗维, 杜婷婷, 李中和, 吕永龙. 近十年太湖生态系统服务功能价值变化评估. 生态学报, 2015, 35(7): 2255-2264.

[29] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 夏朝宗. 1990—2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力. 生态学报, 2014, 34(20): 5962-5973.

[30] 黄志刚, 王小立, 肖烨, 杨飞, 王晨溪. 气候变化对松嫩平原水稻灌溉需水量的影响. 应用生态学报, 2015, 26(1): 260-268.

[31] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, Capistrano D, DeFries R S, Díaz S, Dietz T, Duraiappah A K, Oteng-Yeboah A, Pereira H M, Perrings C, Reid W V, Sarukhan J, Scholes R J, Whyte A. Science for managing ecosystem services: beyond the millennium ecosystem assessment. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(5): 1305-1312.

[32] White C, Halpern B S, Kappel C V. Ecosystem service tradeoff analysis reveals the value of marine spatial planning for multiple ocean uses. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(12): 4696-4701.